# بررسی آزمایشگاهی کارکرد با هم طوق و شکاف بر میزان آبشستگی موضعی در پایه پل*

حسین شریعتی[۱]          سعیدرضا خداشناس[۲]          کاظم اسماعیلی[۳]

**چکیده** *جابه جایی ذره‌های رسوب ناشی از تغییر الگوی جریان، آبشستگی نامیده می‌شود. این پدیده یکی از دلیل‌های پایدار نبودن پل‌ها و در نهایت خراب شدن آن‌ها به شمار می‌رود. از این‌رو ارائه روش‌هایی برای مهار و کاهش آبشستگی اهمیت دارد. به کارگیری تجهیزاتی مانند طوق و شکاف بر روی پایه برای فراهم ساختن پایداری پل‌ها می‌تواند از راهکارهای مناسب برای رسیدن به این هدف باشد. در این پژوهش، نخست کارکرد دو گونه طوق مربعی و دایره‌ای روی یک الگوی تک پایه استوانه‌ای بررسی شد. سپس با ایجاد شکاف روی پایه و ترکیب طوق و شکاف اثر با هم این دو روش در کاهش میزان آبشستگی مورد توجه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان داد، طوق مربعی نسبت به گونه دایره‌ای در کاهش عمق آبشستگی کارکرد بهتری دارد. به کارگیری ترکیبی از طوق و شکاف روی پایه سبب شد عمق آبشستگی به میزان بیشتری کاهش یابد، به گونه‌ای که در این حالت (ترکیب طوق مربعی با W/D=2-5 و شکاف) توانست عمق آبشستگی را تا ۸۰٪ کاهش دهد.*

**واژه‌های کلیدی** آبشستگی، طوق، شکاف، ترکیب طوق و شکاف، پایه پل.

## Effect of Collar- Slot Combination on the Local Scouring Around the Bridge Piers

H.Shariati          S.R.Khodashenas          K.Esmaili

**Abstract** *Scoure is the removal of particle sediment which results variation of flow pattern. Local scour is considered as one of the reasons of instability and ultimately failure of bridges.Therefore, proposing some controlling methods to reduce this phenomenon is essential. In the study, effects of two types of squar and circular collar on a single cylindrical model have been investigated. In the next step by providing a slot through the pier and combination of collar and slot was used to investigate the scouring reduction. The results showed that use of both collar, specically below bed level decreased the scour depth. Square collar was more effective than circular in decreasing the scour depth. Combination of slot and collar on the pier could further reduce the scouring depth in which a square collar with W/D=2.5 in the bed with a slot near the bed reduce scouring depth up to 80 percent consequence.*

**Key Words** Scouring, Collar, Slot, Collar- Slot Combination, Bridge Pier.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۱۰ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۰/۷/۱۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول ، دانش آموخته کارشناس ارشد سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

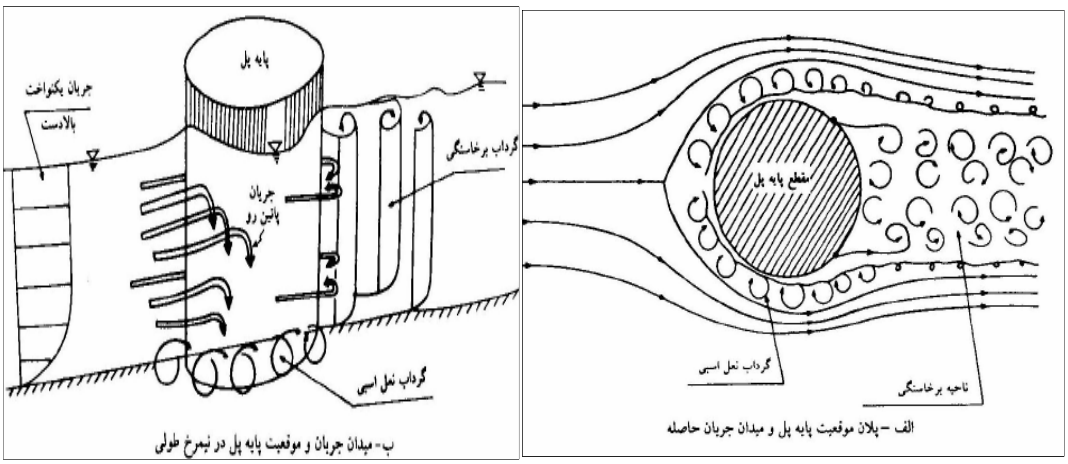
(۲) استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

مطالعه‌های انجام شده نشان می‌دهند که یکی از اصلی‌ترین دلیل‌ها خراب شدن پل‌ها پدیده‌ی آبشستگی است که افزون بر جان باختن بسیاری از انسان‌ها، هزینه‌های زیادی به صورت مستقیم و غیر مستقیم در کشورها به بار می‌آورد. به طور کلی برخورد و جدا شدن جریان از پایه پل دو عامل اصلی در ایجاد آبشستگی در پیرامون پایه پل می‌باشند. برخورد جریان به پایه گرداب نعل اسبی (Horse shoe vortex) را شکل داده و جدایی جریان از پایه گرداب‌های برخاستگی (Wake vortex) را پدید می‌آورد. گرداب نعل اسبی عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه در پیرامون پایه به ویژه در جلوی آن است (شکل۱). پژوهشگران مطالعه‌های آزمایشگاهی و عددی بسیاری را برای شناخت راه‌های کاهش این پدیده انجام داده‌اند.

چیو [1]، در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار از شکاف (سوراخ در درون پایه) به عنوان یکی از روش‌های پیشگیری و کاهش آبشستگی بهره گرفت. آزمایش‌های او نشان داد که با قرارگیری یک شکاف به عرض ۰/۲۵ قطر پایه و ارتفاع دو برابرآن نزدیک بستر به میزان ۲۰ درصد و نزدیک سطح آب تا ۵ درصد به کاهش عمق آبشستگی کمک می‌کند. همچنین، شکافی به عرض نصف پایه می‌تواند عمق آبشستگی را به میزان ۳۰ درصد کاهش دهد [1]. کومار و همکاران [2]، در سال ۱۹۹۹ با انجام آزمایش‌هایی اثر طوق را بر کاهش آبشستگی بررسی کردند. آن‌ها پایه‌های استوانه‌ای شکل به قطر ٦١ و۱۱۲ میلی متر و ۵ اندازه مختلف طوق را به شکل دایره‌ای برای کاهش آبشستگی به کار بردند. مطالعه‌های آن‌ها نشان داد هر چه طوق بزرگتر باشد اثر بیشتری در کاهش آبشستگی خواهد داشت [2]. خداکرمی و همکاران [۳]، در سال ۱۳۸۱ به مطالعه اثر جهت جریان بر عملکرد شکاف در گروه پایه‌های استوانه‌ای پرداختند. بنا به نتیجه‌های آن‌ها، با افزایش زاویه برخورد جریان به پایه از عملکرد شکاف در کاهش آبشستگی کاسته می‌شود [۳]. آقاخانی و همکاران [٤] در سال ۱۳۸۹، اثر هندسه شکاف در کاهش آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها همه آزمایش‌ها را در شدت جریان $\frac{U}{U_c}=0/86$ انجام دادند ( $\frac{U}{U_c}$ نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی در آستانه حرکت). بنا به نتیجه‌های آن‌ها ایجاد شکاف‌های به عرض ۰/۲ و ۰/۳ قطر پایه که تا سطح بستر امتداد یافته بودند، عمق آبشستگی را به ترتیب ٤٤٪ و ۷٤٪ کاهش دادند[٤].




شکل ۱ الگوی سه بعدی جریان پیرامون پایه پل [١٦]

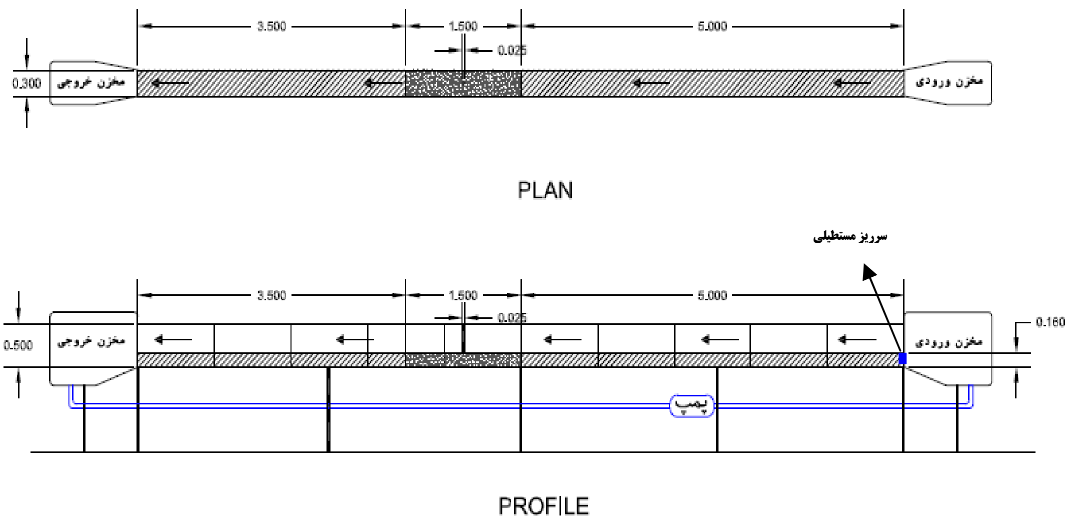
زراتی و همکاران [5]، در سال ۲۰۰٤، نیز اثر طوق در پایه‌های مستطیلی با سه گونه زاویه قرارگیری ($\theta = 0،5، 10$) پایه نسبت به جریان را مورد ارزیابی قراردادند. آن‌ها دریافتند چنانچه طوق عریض‌تر بوده و ارتفاع آن نسبت به بستر کمتر باشد، عملکرد بهتری خواهد داشت. همچنین، کارایی طوق با افزایش زاویه قرارگیری پایه نسبت به جریان، کاهش می‌یابد [5]. پیر محمدی و حیدرپور [٦] در سال ۱۳۸۵، به مقایسه عملکرد طوق در کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های مجموعه دوتایی و سه‌تایی استوانه‌ای شکل پل‌ها پرداختند. نتیجه‌های پژوهش آن‌ها نشان داد که آبشستگی پایه‌های دارای طوق با یک دیرکرد زمانی نسبت به پایه‌های بدون طوق آغاز می‌شود و این دیرکرد در آغاز آبشستگی در پایه‌های عقبی نسبت به پایه‌های جلویی بیشتر است [٦]. ثانی خانی و همکاران [٧] در سال ۱۳۸۸، با استفاده از طوق‌های مستطیلی و دایره‌ای سعی در کاهش آبشستگی در پیرامون پایه‌های استوانه‌ای کردند. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد طوق‌های مستطیلی با بعدهای ۲ و ۲/۵ برابر قطر پایه به ترتیب آبشستگی را به میزان ۲۹ و ٤۹ درصد نسبت به شرایط پایه بدون طوق ، کاهش می‌دهد [٧].

مونکادا و همکاران [8] در سال ۲۰۰۹ به بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد کاربرد طوقی با عرض ۲ برابر قطر پایه می‌تواند آبشستگی را بین ۵۵ تا ۹٦ درصد کاهش دهد. در پژوهش‌های پیشین بیشتر از یک گونه روش (طوق یا شکاف و یا ...) برای کاهش آبشستگی در پیرامون پایه پل استفاده شده است. همچنین، پژوهشگران در استفاده ازطوق، بیشتر از طوق‌های دایره‌ای در پیرامون پایه‌های استوانه‌ای و از طوق‌های مستطیلی برای پایه مستطیلی برای مهار آبشستگی پیرامون پایه پل استفاده کرده‌اند، و در زمینه‌ی شکل و هندسه طوق برای مهار آبشستگی داده‌هایی در دسترس نمی‌باشد. بنابراین، در پژوهش حاضر، نخست برای هدف بررسی و مقایسه عملکرد شکل طوق از دو گونه طوق مربعی و دایره‌ای درکاهش آبشستگی در پیرامون پایه پل استفاده شد و عملکرد طوق‌ها نیز با حالت پایه بدون طوق مورد مقایسه قرارگرفت و در مرحله بعد با ایجاد شکاف روی پایه و ترکیب با طوق، عملکرد باهم طوق و شکاف برای رویارویی با پدیده آبشستگی مطالعه و بررسی شد.

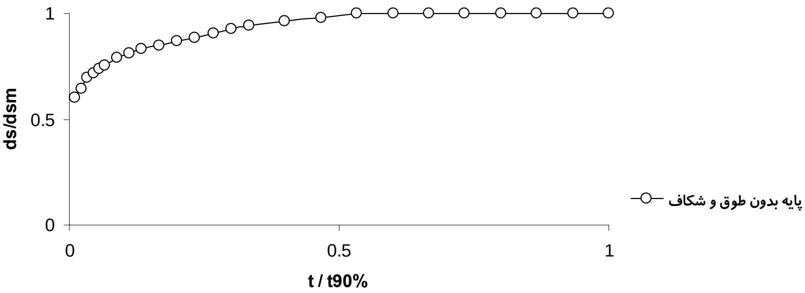
## مواد و روش

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. آب‌راهه مورد استفاده دارای طول ۱۰m، عرض ۳۰cm و ارتفاع ۵۰cm بوده و جنس دیواره آن شیشه‌ای که امکان دیدن جریان را فراهم می‌ساخت. اندازه‌گیری دبی با یک سرریز لبه تیز مستطیلی که در ورودی آب‌راهه نصب و پیشتر واسنجی شده بود انجام می‌گرفت. برای تنظیم عمق از یک دریچه نصب شده در انتهای آب‌راهه استفاده شد (شکل۲). برای توسعه یافتگی کامل جریان بازه آزمایشی به طول ۱/۵m در فاصله ۵ m از ابتدای آب‌راهه در نظر گرفته شد. ضخامت رسوب‌های ریخته شده در بازه آزمایش۱٦ cm بود، بنابراین تراز کف آب‌راهه در بخش بالادست و پایین دست منطقه آزمایش به مقدار مشابه (۱٦cm) بالا آورده شد. برای پیشگیری از اثر جداره بر میزان آبشستگی بنابه توصیه چیو و ملویل [9] بیشترین قطر پایه باید۱۰ درصد عرض آب‌راهه باشد و براساس نظر رادکیوی و اتما [10] نسبت عرض آب‌راهه به قطر پایه باید بزرگتر از ٦/۲۵ باشد [9,10]. بنابراین برای الگو کردن پایه از استوانه‌ای به قطر ۲۵mm از جنس پلاستیک تفلون استفاده شد (شکل٤). برای پیشگیری از تشکیل شکل بستر( ریپل) قطر متوسط ذره‌ها باید از ۰/۷ mm بزرگتر باشد. همچنین، برای حذف اثر رسوب‌ها روی عمق آبشستگی نسبت $\frac{D}{d_{50}} > 20-25$ باشد ( D قطر پایه و $d_{50}$ میانگین اندازه ذره‌های رسوب). بنابراین از رسوب‌هایی با $d_{50}$=۰/۸ mm استفاده شد. از سوی دیگر، چنانچه عمق جریان از ۳/۵ برابر قطر پایه

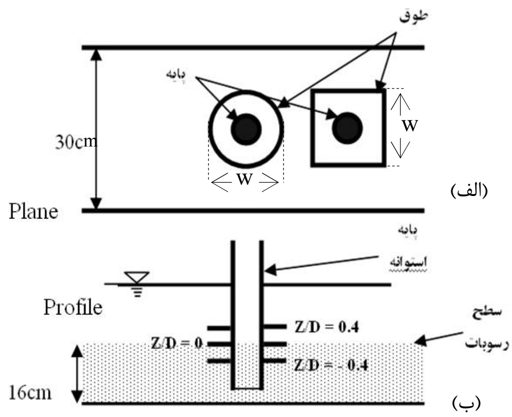
بیشتر باشد، اثری بر میزان آبشستگی نخواهد داشت که این معیار نیز رعایت شد [9]. با توجه به اینکه بیشترین عمق آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد، در مرحله اول با ملاحظه محدودیت‌ها و انجام آزمایش‌های مقدماتی و سعی و خطا عمق و دبی آستانه حرکت ذره‌های بستر به کمک روش شیلدز و رابطه ارائه شده ملویل [11] به ترتیب برابر ۱۰/۵cm و ۱۰lit/s به عنوان شرایط آستانه حرکت انتخاب شد که در این حالت نسبت $\frac{U}{U_c}=0/93$ بود ( $\frac{U}{U_c}$ نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی در آستانه حرکت). برای به دست آوردن زمان تعادل شرایط بستر و پایان هر آزمایش، تغییرهای آبشستگی در محدوده پایه ساده (الگوی شاهد) نسبت به زمان در مدت ۱۵ ساعت ثبت شد. بنا به نتیجه‌های آزمایش پس از ۷ ساعت تغییرهای عمق آبشستگی بسیار کاهش یافته که با نتیجه‌های حاصل از ملویل و چیو [12] هماهنگی دارد. از این رو در کلیه آزمایشات زمان تعادل بستر ۷ ساعت در نظر گرفته شد، هر چند که در چندین الگوی به کار گرفته شده این زمان حتی کمتر از این مقدار بوده است (شکل۳). برای اندازه‌گیری عمق آبشستگی از مقیاس نصب شده روی پایه استفاده می‌شد و عمق جریان در آب‌راهه را یک عمق‌سنج با دقت ±۰/۱mm اندازه‌گیری می‌کرد. شکاف روی الگوی پایه شیاری عمودی به عرض $\frac{۱}{۴}$ قطر پایه و طول دو برابر قطر پایه بود. سپس این شکاف در پایه در دو موقعیت مجاور بستر و بالای بستر (نزدیک سطح آب) قرارگرفت (شکل٤). برای بررسی اثر طوق بر میزان آبشستگی در پیرامون پایه پل از دو گونه طوق (دایره‌ای و مربعی) در سه اندازه $\frac{W}{D}=1/5,2,2/5$ (D قطر پایه و W به ترتیب طول ضلع و قطر طوق مربعی و قطر طوق دایره‌ای) استفاده شد. براساس آزمایش‌های درگاهی [۱۳] اگر نسبت ضخامت طوق به قطر پایه بزرگ باشد، موجب افزایش قطر موثر پایه شده و باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شود. در این پژوهش، صفحه‌هایی به ضخامت ۱ mm مورد استفاده قرارگرفت. همچنین برای بررسی اثر تراز قرارگیری طوق‌ها بر میزان آبشستگی، سه ارتفاع $\frac{Z}{D}=-0/4,0,0/4$ (Z فاصله طوق نسبت به سطح بستر) در نظر گرفته شد (شکل۵). برای نشان دادن توسعه زمانی آبشستگی در همه حالت‌ها از نسبت $d_s/d_{sm}$ ($d_s$ عمق آبشستگی، $d_{sm}$ بیشترین عمق آبشستگی در حالت بدون طوق) در برابر $t/t_{90\%}$ ($t$ زمان و $t_{90\%}$ زمانی که ۹۰ درصد آبشستگی رخ می‌دهد) به کار رفت.



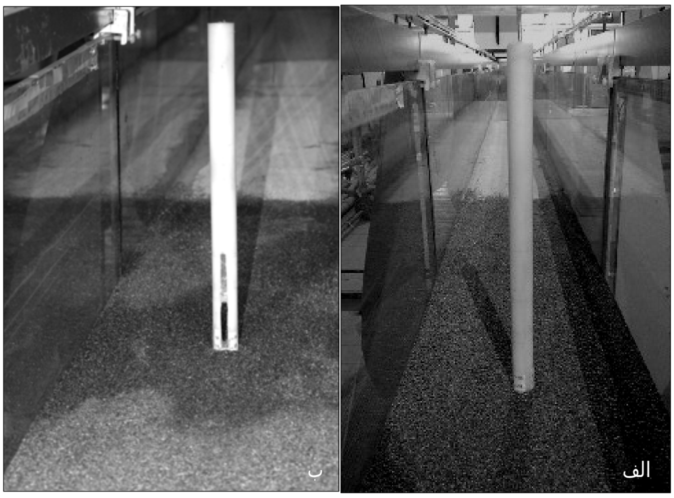

شکل ۲ نمایی از آب‌راهه (فلوم) آزمایشگاهی




شکل ۳ گسترش زمانی آبشستگی در حالت پایه بدون طوق



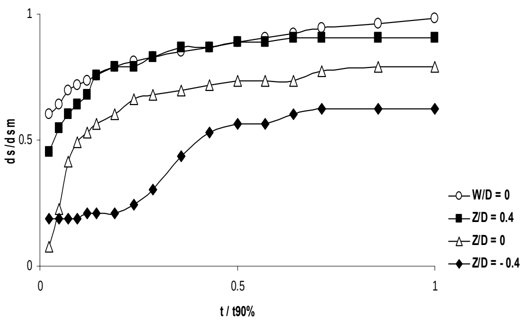

**شکل ٤** (الف) نمایی از پایه قرارگرفته در آب‌راهه (ب) پایه شکافدار نصب شده در بستر



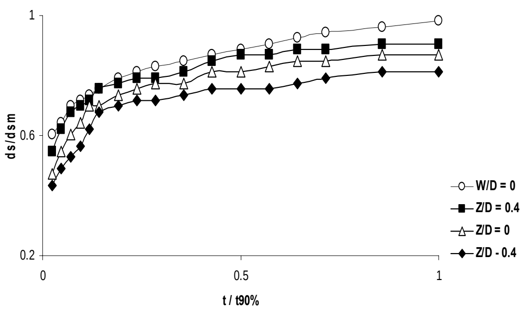

شکل ۵ (الف) پلان (ب) نیمرخ قرارگیری طوق روی پایه

## نتیجه‌ها

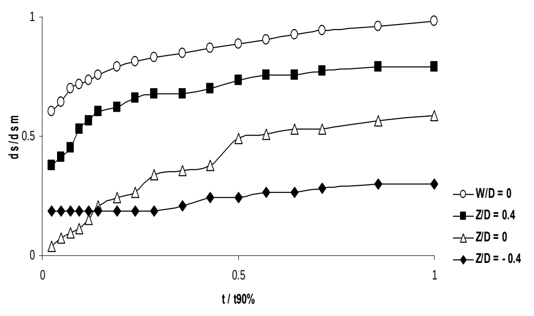
***آزمایش‌های الگوی پایه با طـوق مربعـی. الـف- اثـر ارتفاع نصب طوق.*** شـکل‌هـای (٦)، (٧) و (٨) توسـعه زمانی آبشستگی پیرامون الگو پایه همراه با طـوق مربعـی کـه در ترازهـای مختلـف $\frac{Z}{D}=-0/4,0,0/4$ قرارگرفتـه برای اندازه‌های مختلف بعدهای $\frac{W}{D}=1/5,2,2/5$ را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها نتیجه‌های وابسته به پایـه بـدون طـوق ($\frac{W}{D}=0$) نیـز بـرای مقایسـه رسـم شـده اسـت. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، کاربرد طـوق در پیرامـون پایه سبب کاهش قدرت گرداب‌های نعـل اسـبی شـده و کاهش آبشستگی را در پی دارد. با توجـه بـه نتیجـه‌هـای حاصل، ارتفاع نصب طوق بر روی پایه عامـل مهمـی در کاهش عمق آبشستگی به شمار می‌رود. طوق‌هـای بـالاتر از سطح بستر اثر محسوسی در کاهش آبشستگی از خـود نشان نمی‌دهند. احتمال دارد این امر به علت فاصله ایجاد شده بین طوق و سطح بستر بوده که بـا آغـاز آبشـستگی این فاصله مرتب افزایش می‌یابد و نمی‌تواند مانعی بـرای تشکیل گرداب نعل اسبی باشد. ولی در حالتی که طوق‌ها روی بستر و یا زیر بستر قرار می‌گیرد، با مهار و ضـعیف کردن گرداب‌های نعل اسبی و جریان برخاستگی کـاهش عمق آبشستگی در جلوی پایـه را موجـب مـی‌شـوند. در حالت قرارگیری طوق روی بستر مـشاهده شـد، نخـست پیرامون لبه‌های طوق شیارهایی پدید می‌آید که با گذشت زمان این شیارها گسترش پیدا کرده و عمق آبشستگی را در پیرامون پایـه افـزایش مـی‌دهنـد. در موقعیـت نـصب طوق‌ها زیر بستر، ذره‌های رسـوبی بـالای آن‌هـا بـا آغـاز جریان بـی‌درنـگ شـسته شـد و پـس از رسـیدن حفـره آبشستگی به طوق سرعت آبشستگی کـاهش یافـت. ایـن شرایط نشان می‌دهد طوق بر الگوی جریان اثر گذاشـته و روند فرسایش را تغییر می‌دهد. به طور کلی هر چه طوق پایین‌تر نصب شود درصد کاهش آبشستگی بیشتر خواهد شد. ولی باید در نظر داشت افـزایش عمـق نـصب طـوق موجب افزایش فضای بالای آن شده که خـود بـر میـزان آبشستگی اثر نامطلوب دارد. بنابراین می‌توان گفت عمقی بهینه در زیر بستر برای نصب طوق می‌توان فرض کرد که در آن آبشستگی به کمترین مقدار خود می‌رسد.




شکل ٦ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، پایه با طوق مربعی $\frac{W}{D}=1/5$



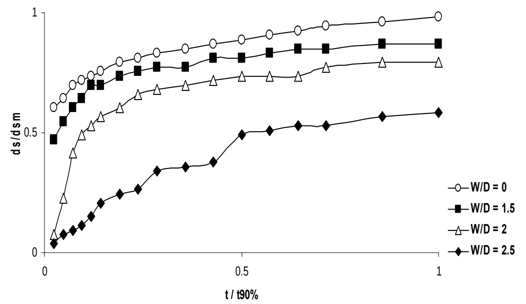

شکل ٧ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، پایه با طوق مربعی $\frac{W}{D}=2$



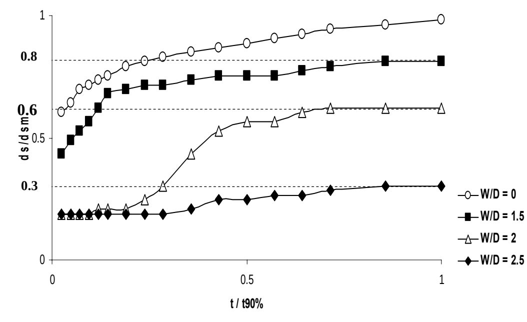

شکل ٨ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، پایه با طوق مربعی $\frac{W}{D}=2/5$

***اثر بعدهای طوق.*** شـکل‌هـای (٩) و(١٠) اثـر بعـدهای طوق مربعی در کاهش آبشستگی با قرارگیری در ترازهای مختلف پایه را نشان می‌دهند. همـان گونـه کـه مـی‌تـوان مشاهده کرد طوق با بعدهای نسبی $\frac{W}{D}=2/5$ برای مهار و کاهش عمق آبشستگی نسبت به دو طوق دیگـر عملکـرد

بهتری از خود نشان می‌دهد. در مورد طوق با بعدهای $\frac{W}{D}=1/5$ به دلیل کوچک بودن عرض اثر اثر چشمگیری بر الگوی جریان در ناحیه حفره آبشستگی نداشت، بنابراین نتوانست اثر زیادی در کاهش عمق آبشستگی از خود نشان دهد، چنان‌که پس از گذشت مدت کوتاهی با گسترش گرداب‌های نعل اسبی عمق آبشستگی افزایش یافت. نتیجه‌های به دست آمده از اندازه‌گیری‌های انجام گرفته برای سه الگوی طوق انتخابی بیان‌گر آنست که نصب طوق با عرض ۱/۵ برابر قطر پایه در زیر بستر می‌تواند عمق آبشستگی را تا ۲۰ درصد کاهش دهد. این مقدار برای طوق با $\frac{W}{D}=2$ به ۴۰ درصد ودر مورد طوق $\frac{W}{D}=2/5$ به ۷۰ درصد می‌رسد.

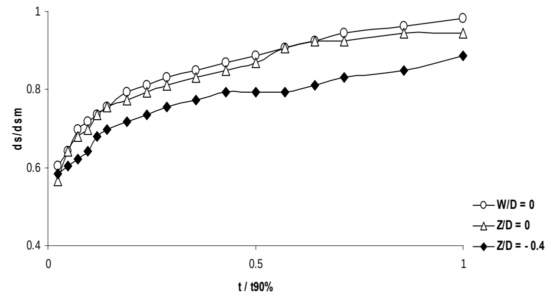



شکل ۹ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، برای طوق مربعی با $\frac{Z}{D}=0$

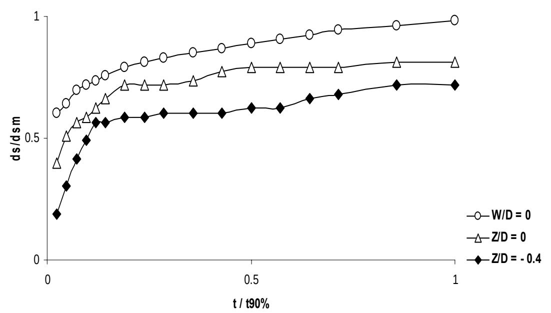



شکل ۱۰ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، برای طوق مربعی با $\frac{Z}{D}=-0/4$

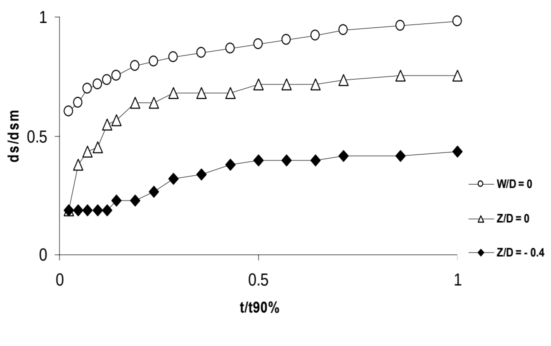
***آزمایش‌های الگوی پایه با طوق دایره‌ای. الف- اثر ارتفاع نصب طوق.*** شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) گسترش زمانی آبشستگی را با بکارگیری طوق دایره‌ای در بعدهای مختلف ($\frac{W}{D}=1/5,2,2/5$) و قرارگیری در ترازهای مختلف $\frac{Z}{D}=-0/4,0$ روی پایه را نشان می‌دهند. با توجه به اثر نامحسوس کاهش آبشستگی در حالت قرارگیری طوق بالای بستر دو تراز انتخابی برای قرارگیری طوق در نظر گرفته شد. نتیجه‌ها بیان‌گر آن است اگر طوق زیر سطح بستر قرار گیرد، اثر بیشتری بر کاهش آبشستگی خواهد داشت.




شکل ۱۱ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، پایه با طوق دایره‌ای $\frac{W}{D}=1/5$

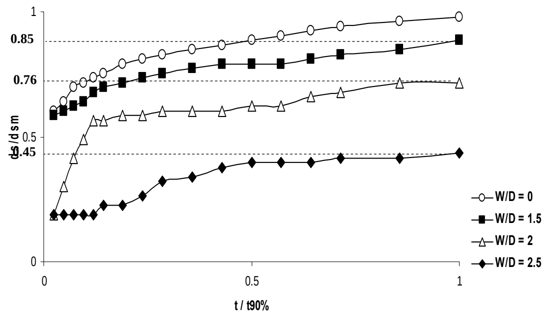



شکل ۱۲ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، پایه با طوق دایره‌ای $\frac{W}{D}=2$

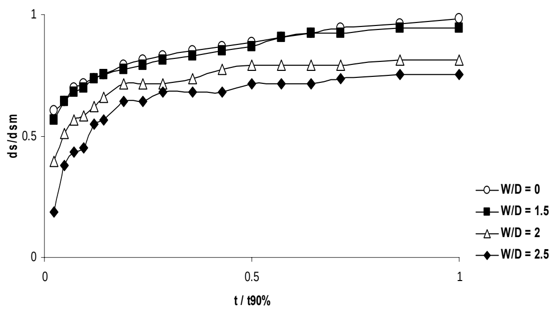



شکل ۱۳ تغییرات زمانی عمق آبشستگی، پایه با طوق دایره‌ای $\frac{W}{D}=2/5$

***ب- اثر بعدهای طوق.*** نمودارهای رسم شده در شکل‌های (۱٤) و (۱۵) اثر بعدهای طوق دایره‌ای را نشان می‌دهند. همانند حالت قبل (طوق مربعی) هرچه طوق بزرگتر باشد اثر بیشتری در کاهش آبشستگی از خود نشان می‌دهد و همان گونه که قابل مشاهده است طوق با بعدهای نسبی $\frac{W}{D}=2/5$ برای مهار و کاهش عمق آبشستگی نسبت به دو طوق دیگر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان بیان داشت افزایش بعدهای طوق و عمق قرارگیری در زیر سطح بستر نتیجه‌های بهتری را در کاهش عمق آبشستگی از خود نشان می‌دهد. به گونه‌ای که نصب طوق با بعدهای $\frac{W}{D}=1/5$ در زیر بستر می‌تواند عمق آبشستگی را تا ۱۵ درصد کاهش دهد. این مقدار برای طوق با $\frac{W}{D}=2$ برابر ۲٤ درصد و در مورد طوق با $\frac{W}{D}=2/5$ برابر ۵۵ درصد می‌باشد (شکل۱۵).




شکل ۱٤ تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای طوق دایره‌ای با $\frac{Z}{D}=0$



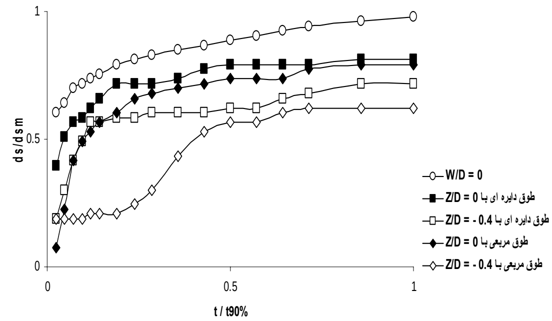

شکل ۱۵ تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای طوق دایره‌ای با $\frac{Z}{D}=-0/4$

براساس رابطه پیشنهادی کومار و همکاران [2] که تنها برای طوق‌های دایره‌ای که روی بستر یا بالای بستر قرار گرفته‌اند، درست است، میزان کاهش آبشستگی با طوق‌های ۲D و ۲/۵D روی بستر به ترتیب ۱۷ و ۲۵ درصد می‌باشد [2]. درصد کاهش عمق آبشستگی در آزمایش‌های بلوچی و همکاران [۱٤] که از طوق‌های دایره‌ای با عرض ۲ و ۳ برابر قطر پایه روی بستر استفاده کرده بودند، به ترتیب ۱۵ و ۳۵ بود. در پژوهش حاضر درصد کاهش آبشستگی برای طوق‌های به قطر ۲D و D ۲/۵ با قرارگیری روی سطح بستر به ترتیب برابر ۱۸ و ۲٤ درصد می‌باشد، هماهنگی خوبی با رابطه‌ی کومار و همکاران [2] و نتیجه‌های بلوچی و همکاران [14] دارد. اختلاف بین درصد کاهش آبشستگی می‌تواند ناشی از نبود یکنواختی ذره‌های رسوبی باشد. همچنین مقایسه نتیجه‌های این پژوهش با نتیجه‌های ثانی خانی و همکاران [۷] از هماهنگی تقریبی خوبی برخوردار است. آن‌ها نشان دادند به کار بردن طوق در زیر بستر نسبت به سطح بستر در کاهش آبشستگی موثرتر می‌باشد. آن‌ها توانستند کاربرد از طوق‌های دایره‌ای با عرض ۲ و ۲/۵ برابر قطر پایه روی بستر عمق آبشستگی را بین ۱۹ تا ۳۵ درصد کاهش دهند و میزان کاهش عمق آبشستگی با به کارگیری طوق‌های مستطیلی با بعدهای یاد شده در زیر بستر به ترتیب ۲۹ و ٤۹ درصد بود [۷]. متفاوت بودن شرایط آزمایش‌ها مانند تفاوت در دانه‌بندی رسوب، زمان آزمایش‌ها، بعدها و تراز قرارگیری طوق‌ها سبب اختلاف‌های بین نتیجه‌های این پژوهش با نتیجه‌های ثانی خانی و همکاران [۷] شده است.

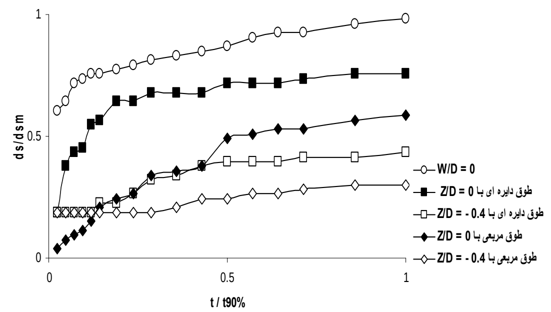
## مقایسه عملکرد طوق دایره‌ای و مربعی برکاهش آبشستگی

شکل‌های (۱٦) و (۱۷) گسترش آبشستگی برای طوق‌های دایره‌ای و مربعی با بعدهای $\frac{W}{D}=2,2/5$ را نشان می‌دهند. با توجه به نتیجه‌های حاصل‌شده طوق‌های مربعی نسبت به دایره‌ای عملکرد موثرتری در کاهش آبشستگی دارند. به نظر می‌رسد استفاده از طوق مربعی به

دلیل داشتن لبه‌های تیز در کناره‌ها نسبت به دایره‌ای برای مهار و کم کردن قدرت گرداب های نعل اسبی و برخاستگی عملکرد بهتری دارد. جدول (۱) درصد کاهش عمق آبشستگی با به کارگیری طوق‌های مربعی و دایره‌ای در بعدهای و ترازهای متفاوت را نشان می‌دهد. نتیجه‌های آزمایش‌ها پایه با شکاف در شکل (۱۸) تغییرات زمانی نسبت عمق آبشستگی به بیشترین عمق آبشستگی برای شرایط پایه بدون شکاف و شکاف دار بالای بستر و روی بستر را نشان می‌دهد. با توجه به عمق جریان (۱۰/۵ cm) شکاف بالای بستر در فاصله‌ی ۰/۵cm از سطح آب قرار داشت. با افزایش سرعت جریان عبوری از شکاف و سپس منحرف شدن آن رو به پایین و نیز در اثر کاهش قطر موثر پایه به علت وجود شکاف، الگوی جریان در این منطقه تغییر کرده وکاهش آبشستگی موضعی در محل پایه را در پی خواهد داشت. نتیجه‌ها نشان می‌دهد موقعیت شکاف بالای بستر اثر چندانی درکاهش آبشستگی ندارد، در حالی‌که شکاف نزدیک بستر می‌تواند عمق آبشستگی را تا ۲۱ درصد کاهش دهد. این مقدار توسط چیو [1]، برای شکاف با عرض ۰/۲۵ قطر پایه نزدیک بستر باعث کاهش ۲۰٪ در عمق آبشستگی شده است. آقاخانی و همکاران [٤] نشان دادند استفاده از شکاف با عرض ۰/۲ قطر پایه و طول شکاف ۱۰cm عمق آبشستگی را به میزان۴۴/۲ درصد کاهش می‌دهد. با توجه به این‌که عملکرد شکاف در کاهش آبشستگی با افزایش شدت جریان کاسته می‌شود، اختلاف ناشی از درصد کاهش آبشستگی ناشی از متفاوت بودن شدت جریان آزمایش‌ها و متفاوت بودن عرض و طول شکاف در پایه است[۱۵].



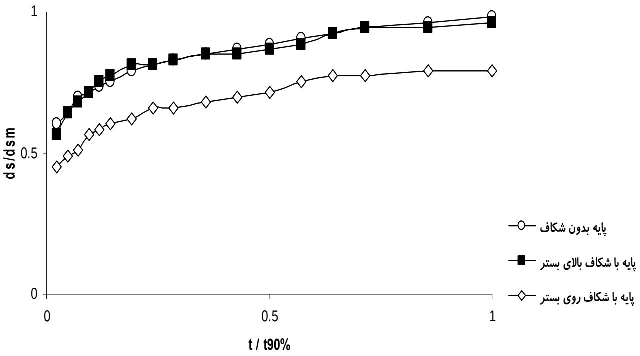

شکل ۱٦ تغییرات زمانی عمق آبشستگی طوق مربعی و دایره‌ای با $\frac{W}{D}=2$




**شکل ۱۷** تغییرات زمانی عمق آبشستگی طوق مربعی و دایره‌ای با $\frac{W}{D}=2/5$

جدول ۱ درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به پایه بدون طوق

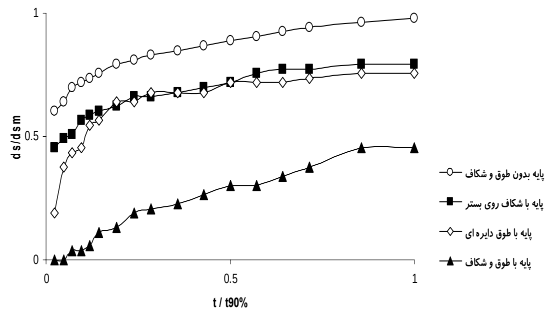
| گونه طوق | بعدهای طوق / موقعیت طوق | $\frac{W}{D}=1/5$ | $\frac{W}{D}=2$ | $\frac{W}{D}=2/5$ |
|---|---|---|---|---|
| طوق دایره‌ای | روی بستر Z/D=0 | ۵/٦ | ۱۸/۸ | ۲٤/۵ |
| | زیر بستر Z/D= -0/4 | ۱۱/۳ | ۲۸/۳ | ۵٦/٦ |
| طوق مربعی | روی بستر ZD=0 | ۱۳/۲ | ۲۰/۷۵ | ٤۱/۵ |
| | زیر بستر Z/D= -0/4 | ۱۸/۸ | ۳۷/۷ | ۷۰ |



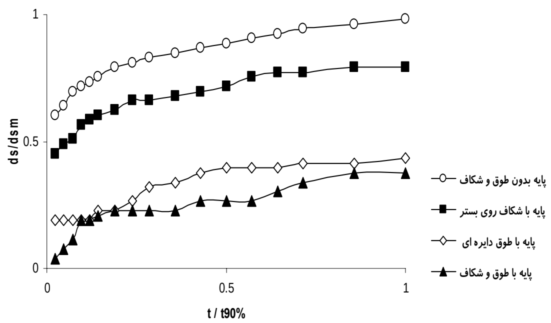

شکل ۱۸ تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای پایه شکاف دار

## ترکیب طوق و شکاف

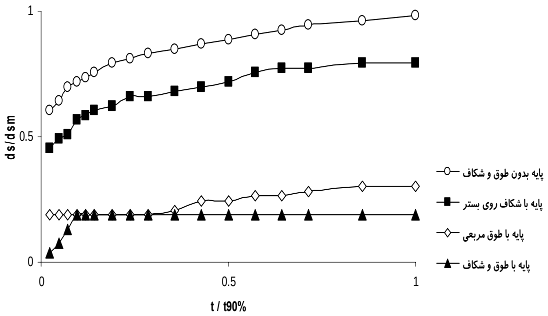
با توجه به این‌که طوق‌های (مربعی و دایره‌ای) با بعدهای بزرگتر ($\frac{W}{D}$=۲/۵) و شکاف روی بستر عملکرد بهتری را درکاهش آبشستگی نسبت به حالت‌های دیگر از خود نشان دادند. از این‌رو آزمایش‌هایی در شرایط ترکیبی طوق و شکاف انجام شد که طوق‌ها با بعدهای $\frac{W}{D}=2/5$ در ترازهای $\frac{Z}{D}=0,-0/4$ و شکاف روی بستر قرارگرفتند. شکل‌های (۱۹)، (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) گسترش زمانی آبشستگی پیرامون الگوی پایه را همراه با طوق و شکاف نشان می‌دهند. همان گونه که مشاهده می‌شود، کاربرد با هم طوق و شکاف باعث کاهش بیشتری در عمق آبشستگی می‌شود. این کاهش در هنگامی که طوق روی بستر قرار دارد، بیشتر است، به گونه‌ای که درصد کاهش عمق آبشستگی در حالت استفاده تنها از طوق مربعی و دایره‌ای ($\frac{W}{D}=2/5$) روی بستر به ترتیب ۴۰٪ و ۲۵٪ است در حالی که ترکیب طوق مربعی و شکاف باعث کاهش۷۳٪ درصد وترکیب طوق دایره‌ای و شکاف موجب کاهش ۵۵٪ درصدی در عمق آبشستگی می‌شود. بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی وابسته به ترکیب طوق مربعی زیر بستر و شکاف می‌باشد، که در این حالت عمق آبشستگی در جلوی پایه تا ۸۱٪ کاهش می‌یابد. جدول (۲) درصد کاهش عمق آبشستگی را در استفاده از روش ترکیبی طوق و شکاف نشان می‌دهد. مقایسه نتیجه‌های حاصل از این پژوهش با آزمایش‌های مونکادا و همکاران [8] نشان می‌دهد که استفاده از روش ترکیبی طوق و شکاف روی پایه موجب کاهش بیشتری در عمق آبشستگی موضعی شده و نسبت به استفاده جداگانه از هر دو روش در کاهش آبشستگی موثرتر می‌باشد [9]. اختلاف ناشی از درصد کاهش های عمق آبشستگی می‌تواند ناشی از اختلاف در طول شکاف روی پایه، بعدهای طوق و اندازه ذره‌های رسوبی باشد.



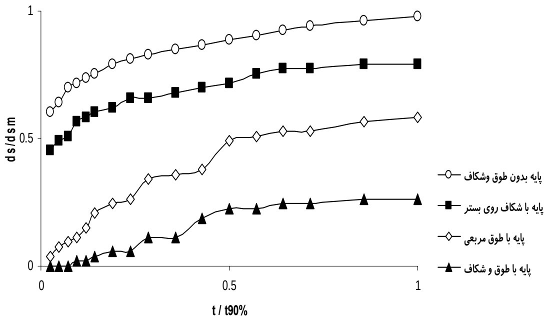

شکل ۱۹ تغییرات زمانی آبشستگی با ترکیب طوق دایره‌ای زیر بستر و شکاف روی بستر




شکل ۲۰ تغییرات زمانی آبشستگی با ترکیب طوق دایره‌ای روی بستر و شکاف روی بستر




شکل ۲۱ تغییرات زمانی آبشستگی با ترکیب طوق مربعی زیر بستر و شکاف روی بستر




شکل ۲۲ تغییرات زمانی آبشستگی با ترکیب طوق مربعی روی بستر و شکاف روی بستر

جدول ۲ درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به پایه بدون طوق در حالت ترکیب طوق و شکاف

| ترکیب طوق و شکاف | موقعیت طوق | درصد کاهش |
|---|---|---|
| طوق دایره‌ای $\frac{W}{D}=2/5$ وشکاف | روی بستر | ٪۵۵ |
| | زیر بستر | ٪٦۲ |
| طوق مربعی $\frac{W}{D}=2/5$ و شکاف | روی بستر | ٪۷۳ |
| | زیر بستر | ٪۸۱ |

## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر برای بررسی مهار و کاهش آبشستگی دو گونه طوق و شکاف بر روی پایه به کار رفت. نخست، کارکرد طوق مربعی و دایره‌ای در بعدهای و ترازهای مختلف و سپس اثر شکاف روی پایه و ترکیب با طوق، مطالعه شد. نتیجه‌ها نشان داد به طور کلی طوق در کاهش عمق آبشستگی موثر است. همچنین به کار بردن استفاده از طوق در تراز زیر بستر نسبت به قرارگیری آن در سایر ترازها موثرتر می‌باشد. با افزایش بعدهای طوق عمق آبشستگی کاهش بیشتری می‌یابد. در مورد شکل طوق نیز می‌توان بیان داشت که استفاده از طوق مربعی به دلیل داشتن لبه‌های تیز نسبت به طوق دایره‌ای برای مهار و کم کردن قدرت گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی کارکرد بهتری داشته و در کاهش عمق آبشستگی موثرتر است، چنان که استفاده از طوقی مربعی با $\frac{W}{D}=2/5$ در موقعیت $\frac{Z}{D}=-0/4$ می‌تواند عمق آبشستگی را تا ۷۰٪ کاهش دهد. استفاده از شکاف نیز می‌تواند با ایجاد جریان افقی، جریان‌های رو به پایین در جلوی پایه را به فاصله دورتر از پایه منحرف کند و عمق آبشستگی را کاهش دهد. شکاف نزدیک سطح آب اثر محسوسی در کاهش آبشستگی ندارد، در حالی که استفاده از شکاف نزدیک بستر می‌تواند عمق آبشستگی را تا ۲۱٪ کاهش دهد. به کار بردن ترکیب دو حالت طوق و شکاف روی پایه عمق آبشستگی به میزان بیشتری کاهش می‌دهد، به طوری که ترکیب طوق مربعی $\frac{W}{D}=2/5$ زیر بستر همراه با شکاف نزدیک بستر عمق آبشستگی را تا ۸۰٪ کاهش داده است.

## مراجع

1. Chiew, Y., "Scour protection at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*,118(9), pp.1260-1269. (1992).
2. Kumar, V., Raja, K., and Vittal, N. "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars.", *Journal of Hydraulic Engineering,* 125(12), pp.1302-1305, (1999).

۳. خداکرمی، ز.، حیدرپور، م.، و افضلی مهر، ح.، " اثر جهت جریان بر عملکرد شکاف در کنترل و کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های استوانه‌ای در شرایط آب زلال."، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۱).

٤. آقاخانی، ا.، فغفور مغربی، م.، و اسماعیلی، ک.، " بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکاف پایه و پایه‌های مجاور هم"، مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۹).

5. Zarrati, A.R., Gholami, H., and Mashahir, M.B., "Aplication of collar to control scouring around rectangular bridge piers." *Journal of Hydraulic Research,* 42(1), pp. 97-103, (2004).

٦. پیرمحمدی، ر.، حیدرپور، م.، " مقایسه عملکرد طوق در کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های سری دوتایی و سه‌تایی استوانه‌ای شکل پل‌ها."، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران، (۱۳۸۵).

۷. ثانی‌خانی، ه.، حسین زاده دلیر، ع.، فرسادی زاده، د.، و ملاحسینی، ش.، " بررسی اثر شکل طوق در کاهش آبشستگی پایه‌های پل"، مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۸).

8. Moncada-M, A.T., Aguirre-PE, J., Bolivar, J.C., and Flores, E.J., " Scour protection of circular bridge piers with collars and slots." *Journal of Hydraulic Research,* 47(1), pp. 119-126, (2009).

9. Chiew, Y.M., and Mellville, B.W., "Local scour around bridge piers." *Journal of Hydraulic Research,* 25(1), pp. 15-26, (1987).

10. Raudkivi, A., and Ettema, R., "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering,* 109(3), pp. 338-350, (1983).

11. Melvill, B.W. "Piers and abutment scour-an integrated approach", *Journal of Hydraulic Engineering,* 123(3), pp. 125-136, (1997).

12. Melville, W., and Chiew, Y. "Time scale for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering,* 125(1), pp. 59- 65, (1999).

13. Dargahi, B. "Controlling mechanism of local scouring", *Journal of Hydraulic Engineering,* 116(10), pp.1197-1214, (1990).

١٤. بلوچی، م.، چمنی، م.ر.، و بیرامی،م.ک.، "بررسی اثر تغییر شکل طوق بر روند و میزان آبشستگی موضعی"، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران ، دانشگاه شهر کرد، (١٣٨٦).

١٥. ادیبان، ح.، حیدرپور، م.، و افضلی مهر، ح.،" بررسی اثر فاصله بین پایه‌ها بر عملکرد شکاف‌ها در کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های استوانه ای شکل"، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۱).

١٦. وزارت نیرو، راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی، نشریه شماره ۳۱۸، انتشارات سازمان مدیریت وبرنامه ریزی کشور، (١٣٨٦).